

DOI:10.12025/j.issn.1008-6358.2017.20161162

## • 专题报道 •

# 便携式设备光线视觉提示改善帕金森病患者冻结步态的数字化评估

丁 航<sup>1△</sup>, 吴 曦<sup>2△</sup>, 袁心一<sup>1</sup>, 沈林勇<sup>1</sup>, 胡小吾<sup>2\*</sup>

1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

2. 海军军医大学附属长海医院神经外科, 上海 200433

**[摘要]** 目的:通过可穿戴设备分析双脚运动参数,评估光线视觉提示对帕金森病患者冻结步态的影响。方法:选择10例表现冻结步态症状的帕金森病患者,其中男性5例,女性5例,平均年龄(62.3±7.8)岁,H&Y评分为3级。患者穿戴便携式设备在引导光线开和关两种状态下直线行走,并记录步长、步频、步速、最大冻结指数(FImax)和平均FI(Flavr)等步态特征参数。结果:引导光线开时,有冻结步态的帕金森病患者步长、步频、步速、FImax和Flavr等特征参数较引导光线关时有明显改善,差异有统计学意义( $P<0.01$ )。结论:可穿戴设备可用于评估冻结步态,光线视觉提示可显著改善帕金森病患者的冻结步态。

**[关键词]** 帕金森病; 冻结步态; 视觉提示; 可穿戴设备**[中图分类号]** R 742.5      **[文献标志码]** A

## Improvement on freezing of gait in Parkinson disease patients by light visual cue: digital evaluation methods with portable motion sensors

DING Hang<sup>1△</sup>, WU Xi<sup>2△</sup>, YUAN Xin-yi<sup>1</sup>, SHEN Lin-yong<sup>1</sup>, HU Xiao-wu<sup>2\*</sup>

1. Mechanical and Electrical Engineering and Automation College, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. Department of Neurosurgery, Shanghai Hospital, Navy Military Medical University, Shanghai 200433, China

**[Abstract]** Objective: To analyze the effect of light visual cue on freezing of gait (FOG) in Parkinson disease (PD) patients by using wearable device. Methods: Totally 10 PD patients with FOG, including 5 male and 5 female, were enrolled. These patients were (62.3±7.8) years and the Hoehn-Yahr scales were all grade 3. The data of straight walking were recorded and analyzed by wearable device, including step length, step frequency, step velocity, the max freezing index (FImax), and average freezing index (Flavr) with lighting visual cue on or off. Results: The step length, step frequency, FImax, and Flavr were significantly improved when the light visual cue was on ( $P<0.01$ ). Conclusions: Light visual cue can significantly improve FOG in PD patients, which can be evaluated by the wearable device.

**[Key Words]** Parkinson disease; freezing of gait; visual cue; wearable device

帕金森病是一种常见于中老年的神经系统变性疾病,临幊上以静止性震颤、运动迟缓、肌强直和姿势步态障碍为主要特征<sup>[1]</sup>。其中,冻结步态是发生于帕金森病中晚期的一种典型的步态障碍症状,其主要的临幊表现为患者在行走时出现瞬变性的短暂停滞或起步困难等,患者感觉自己脚像“粘”在地面上无法迈步,同时伴有双腿的抖动,整个过程持续几秒钟到几分钟。由于冻结步态是一种突发

性、瞬变性的运动异常,其极易导致患者在行走时突然摔倒,严重影响患者身体健康和生活质量<sup>[2-3]</sup>。

冻结步态患者虽然在平地上难以行走,但是大部分早期患者能够正常的上下楼梯。此外,若患者行走时其脚前方出现提示性光标,能够很好地改善冻结步态症状<sup>[4-5]</sup>。视觉提示光线改善帕金森患者冻结步态的可能机制在于外部视觉提示对患者的视神经有一定的刺激作用,增强了运动前区信息

**[收稿日期]** 2016-12-19**[接受日期]** 2017-09-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金(51275282),教育部博士点基金(20123108110009),国家重点研发计划“数字诊疗装备研发”试点专项课题(2016YFC0105900). Supported by National Nature Science Foundation of China (51275282), Doctoral Program of the Ministry of Education of China (20123108110009), and “Digital Equipment of Diagnosis and Treatment” Special Program of National Key Research and Development Plan (2016YFC0105900).

**[作者简介]** 丁 航,硕士生. E-mail:dinghang\_shu@163.com

吴 曦,博士,讲师、主治医师. E-mail:wuxi\_smmu@sina.com

<sup>△</sup>共同第一作者(Co-first authors).<sup>\*</sup>通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31161787, E-mail: huxiaowu\_smmu@sina.com

流,从而激活患者控制肢体运动生物电信号的传递神经通路<sup>[6]</sup>。

目前,帕金森病患者冻结步态多由医师通过量表和问卷评估,具有较大的主观性。此外,既往报道的冻结步态数字化评估方法往往在特定的试验条件下,需要复杂的大型设备来采集运动参数,导致难以在复杂条件下测量冻结步态。因此,本研究采用便携式可穿戴设备采集相关的运动参数,对比帕金森病患者外部光线提示前后的步态差异,分析外部光线提示对于患者冻结步态的影响,以期为在多种复杂条件下对冻结步态进行评估提供参考。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 帕金森病患者由海军军医大学附属长海医院神经外科2016年4月招募,经过长海医院伦理委员会批准,签署知情同意书后自愿参加本研究。由获得统一帕金森病评分量表(the unified Parkinson disease rating scale, UPDRS)评估证书的评分者对所有患者进行H&Y(The Hoehn and Yahr scale)分级量表评分和UPDRS评分。用冻结步态评估表(freezing of gait questionnaire, FOG)进行冻结步态评分<sup>[7]</sup>。入组标准:诊断符合英国脑库临床标准的原发性帕金森病;H&Y分级为3级;FOG量表第3项评分等于4分。排除标准:有明显的下肢肌张力障碍、平衡不稳导致站立及行走困难,肢体僵硬导致抬腿和迈步困难,异动症导致的步态障碍。入选10例患者,分别编号1、2、3、4、5、

6、7、8、9、10。其中男性5例,女性5例;年龄为47~73岁,平均(62.3±7.8)岁;患病时间为6~20年,平均(11.6±4.6)年;H&Y评分平均为(3.2±0.7)分。另选择同期进行健康体检的6例健康人作为对照组,其中男性3例,女性3例;年龄55~68岁,平均(61.17±1.17)岁。

**1.2 装置及应用** 用于为患者提供引导光线提示并采集相关运动参数的装置分为左右脚两个,被穿戴于患者脚踝附近,同时保证设备的超声传感器垂直于地面(惯性传感器的Y轴数据代表加速度)。当患者一脚落地时,位于另一只脚上的装置通过一字型激光器在前方照射出一条引导光线,提示并引导患者行走。同时装置采用九轴加速度计(JY901,深圳君悦智控科技有限公司)采集患者的运动数据,采样频率32 Hz,利用蓝牙4.0模块传输到智能手机中,APP将数据记录到手机SD卡上用于之后的步态分析(图1)。出现冻结步态的帕金森病患者和健康人通过在8 m长的走廊行走采集冻结步态特征(图2)。健康对照在约3 Hz处存在较大的峰值,而冻结步态患者除了在3 Hz处存在振幅峰值,且5~10 Hz处也存在较大的振幅峰值。健康人行走时的加速度频率通常为0.5~3 Hz;而有冻结步态的帕金森病患者由于症状发生时其单脚和双脚会出现高频无规律的抖动现象,因此出现高频加速度数据。因此,将0.5~3 Hz定义为运动频率带<sup>[18]</sup>,代表正常的行走运动;将3~8 Hz定义为冻结频率带,代表冻结步态发生。

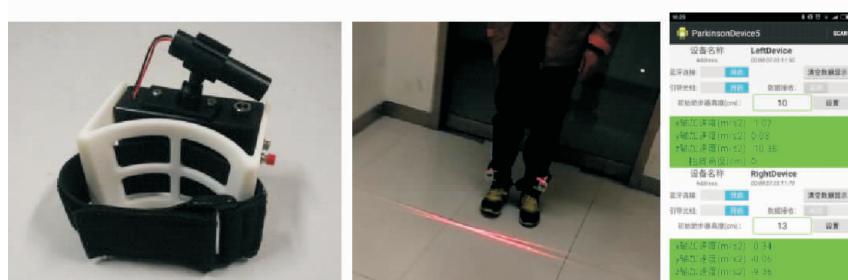


图1 运动数据采集装置及应用

A: 可穿戴设备样机; B: 装置实验场景图; C: 手机 APP 操作界面

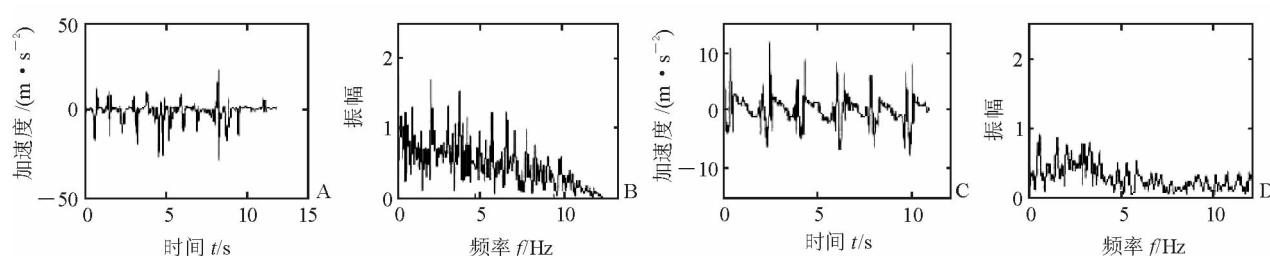


图2 有冻结步态的PD患者和健康对照加速度时域和频域对比图

A: 有冻结步态的PD患者加速度时域; B: 有冻结步态的PD患者加速度频域; C: 健康人加速度时域; D: 健康人加速度频域

1.3 冻结指数(FI) 由于冻结步态是一种突发性及瞬时性的运动症状,其冻结持续时间几秒钟到几分钟,如果仅使用离散傅里叶变换(DFT)对所采集的加速度信号进行分析,只能反映冻结步态的整体情况,而忽略了其时间特性,并且代表冻结步态的高频数据也会被0.5~5 Hz运动频率带的能量所覆盖。因此,参考既往文献<sup>[8]</sup>采用FI,其基于短时傅里叶变换(STFT)数据,反映冻结步态严重程度,定义为冻结频率带中的能量与运动频率带中的能量之比(公式如下)。

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\tau) x(t+\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$\text{FI}(t) = \frac{\int_0^3 |X(t, f)|^2 df}{\int_{0.5}^3 |X(t, f)|^2 df}$$

$X(t, f)$ : 加速度信号  $x(t)$  的 STFT。

通过选取合适的滑动窗口(实验中,  $t=2$  s),利用STFT在时频域下求取的FI可以反映患者冻结步态严重程度在整个测试时间段中的变化情况。FI越大说明患者冻结步态越严重。当患者冻结步态发生时,FI在该时间段上会出现一个峰值。可以选取合适的阈值以判定冻结步态的发生。为了准确

反映受试者使用可穿戴设备进行步态训练时冻结步态的严重程度的整体变化情况,取最大FI值( $\text{FI}_{\max}$ )和平均FI值( $\text{FI}_{\text{avr}}$ )作为特征值。

参与者在长为8 m的走廊上行走两次:第1次在没有引导光线提示的情况下行走;第2次在有引导光线提示的条件下,跨过前方的引导光线行走。测量并采集这两种情况下患者的步态加速度数据,进行对比分析。

1.4 数据采集示例 以4号患者的加速度数据为例。当引导光线关时,在加速度信号中,0~7 s时的加速度信号呈现规律性波动,且较为平稳;而7~13 s时加速度信号改变,呈现高频波动,且波动幅值更大(图3A),同时反映在FI变化(图3B)中。以0.5为阈值,7~13 s时的FI都大于0.5,且有较大的峰值出现(图3B),说明4号对象在这一时间段出现冻结步态。当引导光线开时,在加速度信号中,整个时间段中的加速度信号呈现规律性波动,且没有突变信号产生(图3C);同时,以0.5为阈值,整个时间段中的FI小于或接近于0.5,波动平稳,没有较大的峰值出现(图3D),说明患者行走正常,在引导光线提示下冻结步态有所改善。

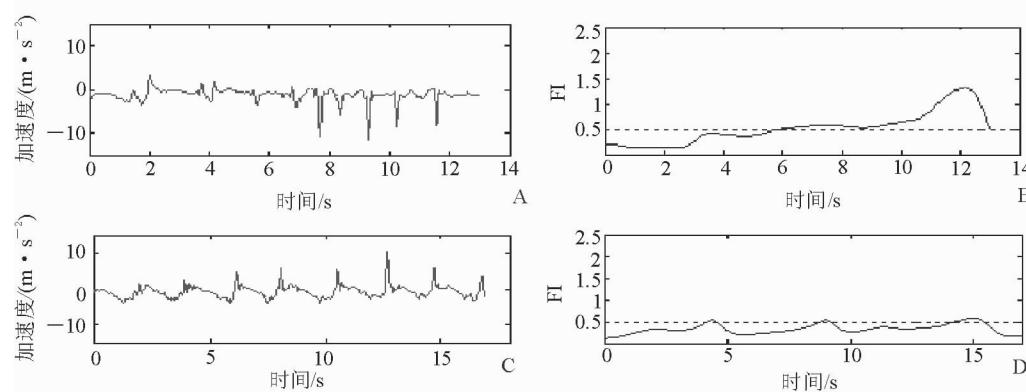


图3 4号患者引导光线开关下的数据分析

A: 引导光线关时的加速度信号; B: 引导光线关时的冻结指数; C: 引导光线开时的加速度信号; D: 引导光线开时的冻结指数。FI: 冻结指数

1.5 统计学处理 采用SPSS 19.0软件进行统计分析。由于受试者人数较少,且所获得的冻结步态相关测试参数为计量资料,故采用配对t检验。检验水准( $\alpha$ ,双侧)为0.01。

## 2 结 果

引导光线关时,受试者平均步长为10.04 cm,平

均步频为103.3步/min,平均步速为11.20 m/min;而引导光线开时,受试者平均步长为27.33 cm,平均步频为71.62步/min,平均步速为19.94 m/min。引导光线开时各运动参数较引导光线关时改善,差异均有统计学意义( $P<0.01$ ,表1、表2)。5号患者由于起步困难(完全迈不开步),使其光线关状态时的步频较小。

表1 各受试者引导光线开关时运动参数值

运动参数	患者1	患者2	患者3	患者4	患者5
步长 $l/cm$					
光关	13.85 ± 3.12	8.67 ± 2.56	20.48 ± 5.37	14.04 ± 3.89	2.11 ± 0.48
光开	31.30 ± 3.07	26.92 ± 2.38	31.38 ± 3.94	28.56 ± 3.75	12.71 ± 1.88
步频 $f/(步 \cdot min^{-1})$					
光关	111.43 ± 16.87	155.10 ± 18.59	126.00 ± 14.72	99.87 ± 9.36	41.54 ± 5.32
光开	81.18 ± 6.75	70.91 ± 5.48	66.67 ± 5.81	63.33 ± 5.25	61.46 ± 4.66
步速 $v/(m \cdot min^{-1})$					
光开	15.43 ± 4.69	13.45 ± 4.51	25.80 ± 5.23	14.02 ± 3.92	0.88 ± 0.16
光关	25.41 ± 4.24	19.09 ± 3.92	20.92 ± 3.84	18.09 ± 3.77	7.81 ± 1.26
FImax					
光关	1.57 ± 0.18	2.05 ± 0.24	1.12 ± 0.07	1.32 ± 0.13	1.78 ± 0.20
光开	0.54 ± 0.03	0.31 ± 0.02	0.55 ± 0.06	0.58 ± 0.05	0.57 ± 0.03
FIavr					
光关	0.77 ± 0.07	1.17 ± 0.08	0.69 ± 0.06	0.52 ± 0.05	0.87 ± 0.07
光开	0.26 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.40 ± 0.04	0.33 ± 0.03	0.26 ± 0.02
运动参数	患者6	患者7	患者8	患者9	患者10
步长 $l/cm$					
光关	7.24 ± 2.55	2.56 ± 0.53	12.82 ± 2.87	8.04 ± 2.09	10.61 ± 3.81
光开	26.92 ± 2.79	27.54 ± 2.60	36.65 ± 3.91	22.50 ± 2.37	28.79 ± 2.63
步频 $f/(步 \cdot min^{-1})$					
光关	91.58 ± 9.29	88.24 ± 8.46	108.57 ± 9.18	107.14 ± 8.38	103.53 ± 8.05
光开	40.59 ± 3.82	86.67 ± 7.03	97.50 ± 7.59	80.00 ± 6.30	67.89 ± 5.27
步速 $v/(m \cdot min^{-1})$					
光关	6.63 ± 2.37	2.26 ± 0.68	13.92 ± 3.84	8.61 ± 2.63	10.98 ± 3.01
光开	10.93 ± 2.07	23.87 ± 3.98	35.73 ± 4.69	18.00 ± 3.10	19.55 ± 3.25
FImax					
光关	3.82 ± 0.36	3.29 ± 0.28	1.25 ± 0.05	1.43 ± 0.16	1.36 ± 0.11
光开	0.57 ± 0.04	1.11 ± 0.08	0.64 ± 0.05	0.56 ± 0.06	0.65 ± 0.05
FIavr					
光关	1.23 ± 0.10	1.87 ± 0.12	0.57 ± 0.05	0.63 ± 0.06	0.53 ± 0.05
光开	0.23 ± 0.01	0.64 ± 0.05	0.35 ± 0.04	0.29 ± 0.03	0.26 ± 0.02

FImax:最大冻结指数; FIavr:平均冻结指数

表2 受试者各运动引导光线开关时比较

状态	步长 $l/cm$	步频 $f/(步 \cdot min^{-1})$	步速 $v/(m \cdot min^{-1})$	FImax	FIavr
光关	10.04 ± 5.58	103.30 ± 28.86	11.20 ± 7.19	1.90 ± 0.92	0.89 ± 0.43
光开	27.33 ± 6.33	71.62 ± 15.75	19.94 ± 7.69	0.61 ± 0.20	0.32 ± 0.13
P 值	0.000	0.008	0.007	0.001	0.001

### 3 讨论

本研究通过一种便携式可穿戴设备收集运动参数,进而分析外部光线提示对帕金森病患者冻结步态的影响。结果显示,外部引导光线开时,有冻结步态的帕金森病患者的步长、步频、步速、FImax、FIavr 均较引导光线关时改善( $P < 0.01$ )。其中,引导光线开时患者的步长与引导光线距离患者脚前方的距离可能有一定相关性。由于冻结步态患者在冻结发生时会有明显的抖动和碎步现象,而在外部光线开时碎步现象明显减少,因此步频减小。5

号患者由于起步困难(完全迈不开步),使其光关状态下步频较小。FImax 和 FIavr 在光线开时减小说明患者在该状态下起步犹豫和行走抖动等症状减轻。

研究光线提示对冻结步态的影响时,可采用不同的参数:Egerton 等<sup>[9]</sup>根据胫骨前肌和内侧腓肠肌的肌电数据及足底压力中心的变化分析了激光手杖对冻结步态患者的影响;Donovan 等<sup>[10]</sup>采用冻结步态问卷及摔跤频率评估长期光线提示训练对冻结步态的影响;Velik 等<sup>[11]</sup>通过对使用光线提示设备前后冻结步态发生的时间长短及次数来反

映光线提示对冻结步态的效用。另外,可采用不同的视觉提示设备来研究光线提示对冻结步态的影响:Ferrarin等<sup>[12]</sup>采用光刺激眼镜来改善冻结步态,并通过前后步态参数的变化来验证其改善效果;Janssen等<sup>[13]</sup>用智能眼镜提供虚拟的3D视觉提示。上述研究中所采用的视觉提示设备只提供光线,从而辅助患者行走。而本研究设计的可穿戴设备不仅能提供光线,还能通过传感器实时采集患者的运动数据,且更全面,因而有利于进行步态评估。本研究结果与上述研究一致,说明视觉提示的存在比提示的内容和形式更加重要。

综上所述,本研究初步反映了光线提示对帕金森病患者冻结步态有一定的改善作用。本试验的局限性是样本量较小,且仅测试了患者直线行走时的运动参数,后期将进一步增加样本量,并将UPDRS评分中的冻结评分项与患者Flavr等参数进行回归分析,以验证数字化评估结果与临床医师评估结果之间的相关性,以提高临床评估水平。

## 参考文献

- [1] CONNOLLY B S, LANG A E. Pharmacological treatment of Parkinson disease: a review [J]. JAMA, 2014, 311(16): 1670-1683.
- [2] SCHAAFSMA J D, BALASH Y, GUREVICH T, et al. Characterization of freezing of gait subtypes and the response of each to levodopa in Parkinson's disease[J]. Eur J Neurol, 2003, 10(4): 391-398.
- [3] OKUMA Y, YANAGISWA N. The clinical spectrum of freezing of gait in Parkinson's disease[J]. Mov Disord, 2008, 23 Suppl 2: S426-S430.
- [4] AHLRICH C, SAMÀ A, LAWÓ M, et al. Detecting freezing of gait with a tri-axial accelerometer in Parkinson's disease patients[J]. Med Biol Eng Comput, 2016, 54(1): 223-233.
- [5] 汪丰,邹亚,乔子晏,等.帕金森患者步行运动的定量分析[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(2):266-269.
- [6] BUTTING-PERRY L, SPINDLER M, ROBINSON K M, et al. Laser light visual cueing for freezing of gait in Parkinson disease: a pilot study with male participants[J]. J Rehabil Res Dev, 2013, 50(2): 223-230.
- [7] GILADI N, TAL J, AZULAY T, et al. Validation of the freezing of gait questionnaire in patients with Parkinson's disease[J]. Mov Disord, 2009, 24(5): 655-661.
- [8] MOORE S T, MACDOUGALL H G, ONDO W G. Ambulatory monitoring of freezing of gait in Parkinson's disease[J]. J Neurosci Methods, 2008, 167(2): 340-348.
- [9] EGERTON C J, MCCANDLESS P, EVANS B, et al. Laserlight visual cueing device for freezing of gait in Parkinson's disease: a case study of the biomechanics involved [J]. Physiother Theory Pract, 2015, 31(7): 518-526.
- [10] DONOVAN S, LIM C, DIAZ N, et al. Laserlight cues for gait freezing in Parkinson's disease: an open-label study[J]. Parkinsonism Relat Disord, 2011, 17(4): 240-245.
- [11] VELIK R, HOFFMANN U, ZABALET A H, et al. The effect of visual cues on the number and duration of freezing episodes in Parkinson's patients [C]//Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 4656-4659.
- [12] FERRARIN M, BRAMBILLA M, GARAVELLO L, et al. Microprocessor-controlled optical stimulating device to improve the gait of patients with Parkinson's disease[J]. Med Biol Eng Comput, 2004, 42(3): 328-332.
- [13] JANSSEN S, BOLTE B, NONNEKES J, et al. Usability of three-dimensional augmented visual cues delivered by smart glasses on (freezing of) gait in Parkinson's disease[J]. Front Neurol, 2017, 8: 279.

〔本文编辑〕姬静芳